

David MIKOLÁŠEK¹, Anežka JURČÍKOVÁ², Jiří BROŽOVSKÝ³

MODEL NUMERICKÉ ANALÝZY KOLEJNICE TVARU 49 E1

NUMERICAL ANALYSIS MODELS OF 49 E1 RAIL

Abstrakt

Příspěvek se zabývá analýzou statického chování vybraného typu kolejnice 49 E1. Tyto kolejnice se často používají v oblasti ostravsko-karvinského regionu i v dalších oblastech, kde dochází k poklesu vlivem důlní činnosti. Kolejová doprava a její technologická infrastruktura je touto činností ovlivněna. Vzhledem k časovému charakteru odezvy poklesu podloží je v zájmu provozovatelů této dopravy najít efektivní a jednoduchý nástroj na předpověď chování této infrastruktury. Jedním z prvních kroků nutných k vytvoření takového nástroje je právě podrobný popis chování kolejnic vystavených namáhání v důsledku poklesu podloží. V této práci je sledován především rozdíl mezi prutovým konečně prvkovým modelem a objemovým modelem.

Klíčová slova

Železniční svršek, analýza tuhosti, kolejnice, pokles podloží.

Abstract

This paper deals with the static analysis of the 49 E1 type rails. These rails are often used in the Ostrava-Karvina region and also in other areas influenced by subsoil decreasing induced by mining activities. Even rail transport and its technological infrastructure can be affected by the subsoil decreasing. Due to the nature of the response time decrease in soil it is in the interest of the rail service providers to find an efficient and simple tool to predict the behavior of railway structures. The deeper understanding of the rail static behaviour should be one of the basic steps to create such tool. This work mainly studied the difference between the beam and the volume finite element model.

Keywords

Railway superstructure, stiffness analysis, rails, subsoil decreasing.

1 ÚVOD

Při hornické činnosti dochází k ovlivnění všech staveb na povrchu, liniové stavby (železnice, silnice) nevyjímaje. Projevy této činnosti se objevují nejčastěji v podobě denivelací, natočení a vodorovných posunů podloží staveb. Jejich velikost a časový průběh závisí na celé řadě geologických, hydrogeologických a báňských podmínek a v neposlední řadě také na způsobu provedení liniové stavby a na tom, do jaké míry je tato připravena reagovat na předpokládané vlivy. Cílem zabezpečení musí být vždy minimalizace škod, resp. jejich průběžné odstraňování až do doby

¹ Ing. David Mikolášek, Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 32 1391, e-mail: david.mikolasek@vsb.cz.

² Ing. Anežka Jurčíková, Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 32 1391, e-mail: anezka.jurcikova@vsb.cz.

³ Doc. Ing. Jiří Brožovský, Ph.D., Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 32 1321, e-mail: jiri.brozovsky@vsb.cz.

stabilizace horninového prostředí po ukončení hornické činnosti. U železničních tratí [1] mají projevy poddolování vliv na stavbu železničního svršku, železničního spodku i na doprovodné objekty, včetně elektrické trakce, sdělovacího a zabezpečovacího zařízení, signalizace apod. Vlivem deformací terénu jsou do konstrukcí vnášena napětí, což zpravidla způsobuje změny v konstrukcích dopravních staveb, ústící v závady a poruchy, které ohrožují bezpečnost a plynulost dopravy. V současné době používané postupy pro návrh a posouzení jak jednotlivých prvků [2] a [11], tak celého systému dopravní cesty (železniční svršek s kolejovým ložem i pevná jízdní dráha, železniční spodek, vozovka atd.) mají určitá omezení. Podobnou analýzou kolejové tratě se zabývá [3], kde je však výpočetní model pouze dvourozměrný. Uvedený typ analýzy se často kombinuje i s problematikou únavy [4]. V řadě případů se také využívá modální analýza [6]. Uvedené modely neumožňují zahrnout nejistotu údajů, zvláště pak vliv napětí a deformací vnášených do konstrukce vlivem hornické činnosti. Pro použití přesnějších nástrojů, které by vyžadovaly pravděpodobnostních přístupů, je nejprve nutné získat přesnější popis jevů, které nastávají v konstrukčních prvcích železničních tratí, vystavených důsledkům hornické činnosti. V tomto příspěvku se proto studuje chování kolejnice typu 49 E1 vystavené deformačnímu zatížení.

Analýza kolejového svršku je provedena pomocí dvou typů modelů. První model je vytvořen pomocí objemových dvaceti uzlových konečných prvků SOLID95 v programu ANSYS [5] a druhý model je tvořen prutovým konečným prvkem v programu SCIA [8]. Důvodem pro volbu dvou typů modelů byla skutečnost, že program ANSYS umožňuje provádět fyzikálně i geometricky nelineární analýzy na objemovém modelu. Nelineární analýze rovinných výpočetních modelů se věnuje například [10]. Nelineární analýzu a prostorový výpočetní model používá v uvedené oblasti například [7]. Prutový model v programu SCIA umožňuje do výpočtu zahrnout geometrickou a konstrukční nelinearitu, ale neumožňuje provést fyzikálně nelineární výpočet. Je však vhodný jako základní ověření výsledků z programu ANSYS. Velkým kladem prutového modelu je jeho využitelnost pro praktické úlohy velkého rozsahu, protože není po stránce tvorby geometrie ani výpočtově tak náročný jako model objemový.

Cílem těchto strukturálních analýz je předběžné určení parametrů tuhostí kolejového svršku a jeho částí. Výstupy z těchto dvou modelů pak poslouží ke stanovení vstupních parametrů takového prutového modelu, který by měl být později využit při namáhání nejen popuštěním podloží, ale i teplotním a silovým namáháním tak, aby bylo možno provádět analýzy reálných konstrukcí železničního svršku. Výpočty s dalšími uvedenými typy zatížení a jejich kombinacemi budou předmětem dalších prací na toto téma.

2 GEOMETRIE, ZATÍŽENÍ A MATERIÁLOVÝ MODEL 49 E1

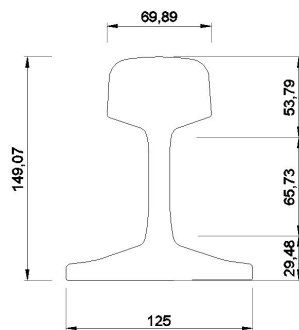
V tomto článku jsou studovány dva typy úloh. V první úloze je řešena deformace a tuhost kolejnice 49 E1 pomocí modelu tvořeného prutovým konečným prvkem a modelem z objemových konečných prvků. Na obr. 1 (b) je znázorněn příčný řez kolejnicí 49 E1. Tato kolejnice byla modelována oběma uvedenými konečně-prvkovými modely [12]. Prutovým konečným prvkem byl ověřován objemový model, který byl vytvořen pro výpočet tuhosti kolejnice o délce 3 m. Objemový model byl počítán jako geometricky a fyzikálně nelineární. Pro komplexnější vyhodnocení nelineárního výpočtu byl tento objemový model v programu ANSYS počítán s různými kombinacemi nelinearit. Statické schéma je patrné z obrázku 4 a odpovídá spojitému nosníku o pěti polích se čtyřmi vnitřními podporami ve vzdálenosti 600 mm. Zatížení bylo zavedeno ve formě deformace. Dvěma vnitřními podporám bylo zadáno posunutí 20 mm směrem dolů. Hodnota popuštění podpor (20 mm) byla zvolena s cílem, aby v kolejnici vznikla napětí za mezí kluzu a projevila se tak výrazněji fyzikální nelinearita. Do prutového modelu SCIA byl průřez kolejnice 49 E1 importován pomocí CAD systému. Poté byl převeden pomocí metody konečných prvků na průřezové charakteristiky použité v databázi programu SCIA.

Druhý typ úlohy řeší kolejnici délky 600 m tvořenou z jednotlivých 25 m dlouhých segmentů, navzájem propojených koncovými spojkami. Detail skutečné spojky je na obrázku 1(a). V modelu použité deformace byly získány při měření na reálné trati vystavené důsledkům hornické činnosti. Změřené poklesy jsou zobrazeny na obrázku 2(b). Pro tuto úlohu byl sestaven model v programu

SCIA pomocí prutových konečných prvků. Pro úsek uvedené délky by nebylo možné sestavit objemový model, protože ten by byl z hlediska výpočetních nároků za hranicí možností běžné výpočetní techniky [5].

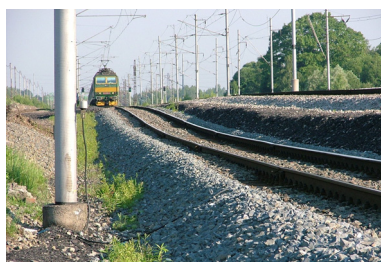


(a)

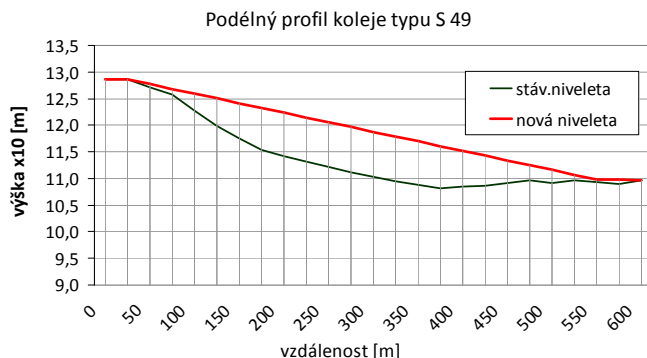


(b)

Obr. 1: (a) Kolejnicový styk kolejnice typu 49 E1; (b) Geometrie průřezu 49 E1



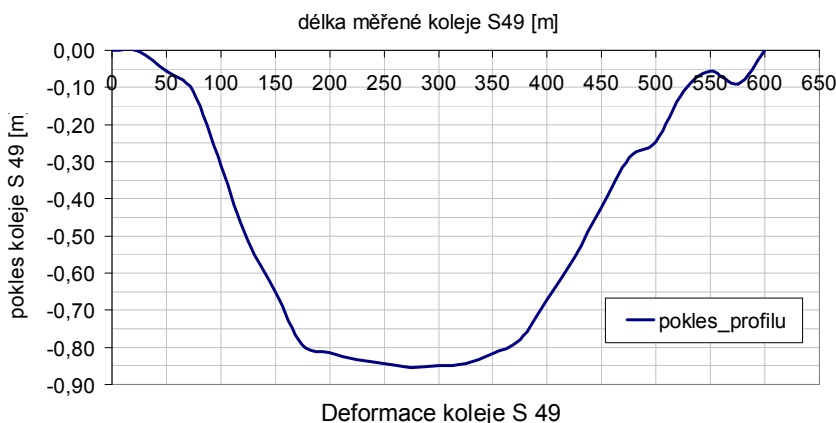
(a)



(b)

Obr. 2: (a) Ilustrační foto deformace kolejového svršku; (b) Skutečné hodnoty deformací

Na obrázku 3 je zachycen detailnější pohled na deformovanou kolejovou trať a pokles kolejového svršku. Je zde vidět, především v pravé části křivky, změna průběhu deformace kolejnice (konvexní na konkávní a zpět na konvexní). Tyto deformace byly jako popuštění zadány do modelu v programu SCIA. I přes délku kolejnice (celková délka řešeného modelu kolejnice je 600 m) byl výpočet poměrně rychlý. Výpočet byl proveden jako geometricky nelineární (výpočet s přihlédnutím k teorii druhého řádu) s konstrukční nelinearitou v podobě prokluzů v místě napojení jednotlivých segmentů kolejnic. Dále byly v tomto řešení zohledněny pružné tuhosti v podporách ve vodorovném směru. Tímto způsoben byl simulován vliv tuhosti podloží, který brání vodorovnému posunu koleje způsobenému svislým pouštěním podpor. Do tuhosti kolejnice byla zahrnuta i rotační tuhost přípoje segmentů kolejnic. Byl vytvořen zjednodušený skořepinový model simulující tento spoj a z něj pak byla spočtena rotační tuhost přípoje spojky. Velikost této rotační tuhosti byla stanovena na hodnotu $K_\phi = 2,4 \text{ MNmrad}^{-1}$. Zjednodušený model přípoje mezi kolejnicemi spojkou byl vytvořen v programu SCIA. Důvodem byla snaha o inženýrský přístup k řešení této úlohy, kdy za pomoci běžně dostupných softwarů je možné vytvořit složitější modely konstrukcí, které mohou projektantovi přiblížit chování spoje. V programu ANSYS by taková analýza mohla být poměrně výstižná, ale prakticky orientující se konstruktér většinou nemá možnost a programové vybavení pro používání cenově náročných konečně-prvkových systémů (ANSYS, ABAQUS nebo MARC). Pro potřeby přesnějších analýz spoje kolejnic bude ale nutné vytvořit výstižnější numerický model (ANSYS) a doplnit jej o fyzikální test.



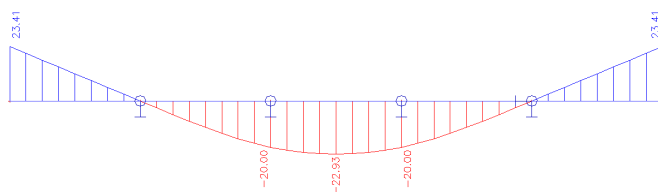
Obr. 3: Detailní pokles kolejového svršku

Materiál kolejnice je ocel značky 700 podle normy UIC80060-V s mezí pevnosti $f_{u,k} = 680$ MPa. Mez kluzu byla stanovena na hodnotu $f_{y,k} = 490$ MPa. V prutovém modelu v programu SCIA, kde jsou uváženy pouze geometrické nelinearity, nejsou pro výpočet deformací meze kluzu a pevnosti využity. Ocel pro prutový a objemový model má stejný Youngův modul pružnosti $E = 210$ GPa. Pracovní diagram objemového modelu byl bilineární s 5 % zpevněním. Použitý model materiálu je tedy zjednodušený, i když odpovídá poměrům na konkrétní trati. Na dále uvedené výsledky je proto potřeba pohlížet jako na předběžné. Kolejnice 49 E1 pocházející z jiné výroby mohou vykazovat podstatně odlišné chování materiálu (odlišný typ oceli), které může být křehkého charakteru bez výrazného plastického chování, které je předpokládáno v tomto případě.

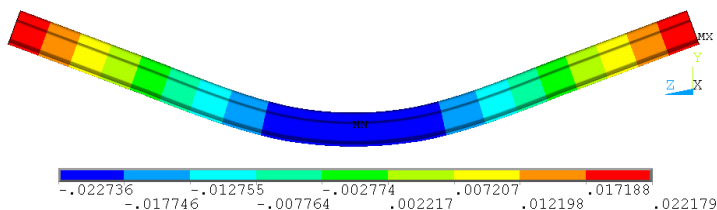
Prutový model kolejnice o délce 3 m byl vytvořen pro srovnání výsledků s objemovým modelem a pro ověření a stanovení vstupních parametrů pro prutový model úseku o délce 600 m.

3 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

První úloha se zabývala analýzou tuhosti kolejnice jako samostatného třimetřového prvku za účelem získání odezvy na deformační zatížení.



Obr. 4: Deformace prutového modelu kolejnici typu 49 E1 SCIA [mm]

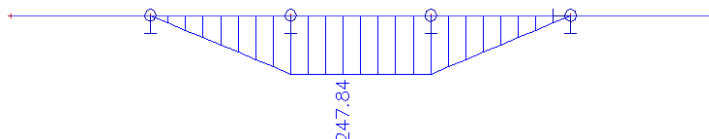


Obr. 5: Deformace objemového modelu kolejnici typu 49 E1 ANSYS [m]

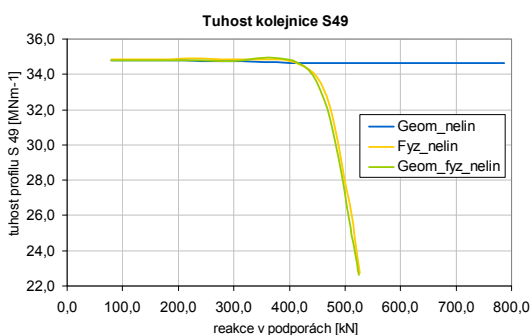
Na obr. 4 je zobrazena deformace prutového modelu při deformačním zatížení, kdy vnitřní podpory byly posunuty o $U_y = 20$ mm směrem dolů. Prutový model v programu SCIA je geometricky nelineární. Na obr. 5 je vykreslena deformace získaná programem ANSYS na objemovém modelu

geometricky nelineárním výpočtem. Srovnáním obou obrázků a hodnot deformací je patrná shoda jak průběhu, tak i hodnot deformací. Deformace na těchto modelech kolejnice se shodují téměř na 99 %.

Na obrázku obr. 6 jsou vykresleny ohybové momenty stanovené pomocí programu SCIA na spojitém nosníku o pěti polích. Tento průběh platí pro idealizovaný nosník, který je upnutý na čtyřech liniových podporách s možností pootočení na těchto hranách. Skutečné upnutí kolejnice 49 E1 je poněkud jiné, ale pro zjištění tuhostních a deformačních charakteristik části kolejnice je použitý model dostačující. Tyto momenty jsou vyvolány poklesem vnitřních podpor o 20 mm směrem dolů.

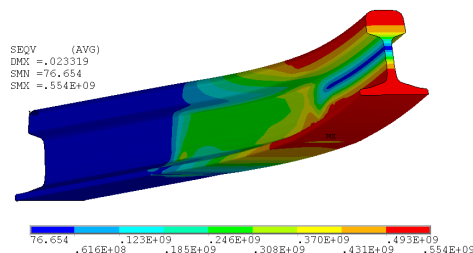


Obr. 6: Momentový obrazec kolejnice typu 49 E1 [kNm]



Obr. 7: Průběh křivek tuhostí na kolejnici 49 E1 [MNm⁻¹]

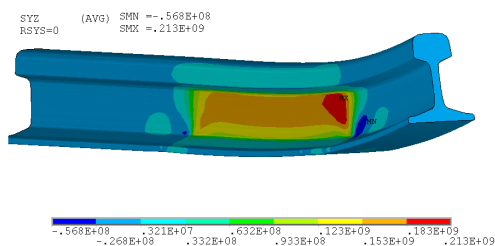
Objemový model byl spočten pro čtyři varianty nastavení geometrické a fyzikální nelinearity. V prvním případě byla úloha počítána jako geometricky a fyzikálně lineární, ve druhém jako geometricky nelineární, ve třetím případě pak jako fyzikálně nelineární a v posledním, čtvrtém, případě jako geometricky i fyzikálně nelineární. Na obr. 7 představuje křivka *Geom_nelin* geometricky nelineární model. Z průběhu křivky je patrná téměř lineární odezva deformace na zatížení s maximální sumou reakcí ve svislém směru kolem 800 kN. Tato hodnota je shodná s výslednicí reakce na prutovém modelu v programu SCIA. Křivky *Fyz_nelin* a *Geom_fyz_nelin* jsou téměř shodné. Z těchto průběhů vyplývá, že geometrická nelinearita nehraje v tomto modelu zásadní roli. Rozhodující vliv na průběh křivek jednotlivých tuhostí podle obr. 7 má fyzikální nelinearita.



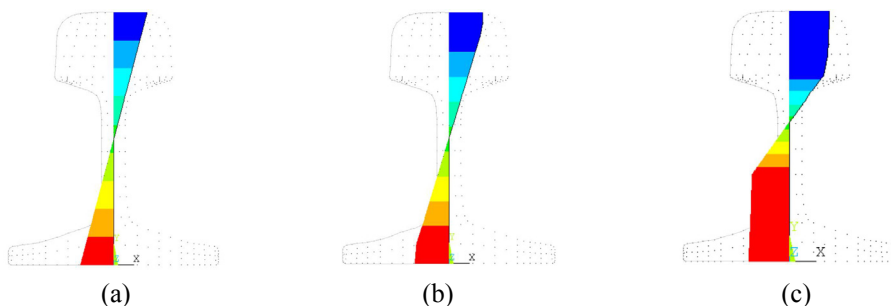
Obr. 8: Symetrická polovina třímetrové kolejnice – von Misesovo napětí [MPa]

Výše uvedené obrázky obr. 8 a obr. 9 jsou symetrické poloviny třímetrové kolejnice. Na obr. 8 je vykresleno von Misesovo napětí a na obr. 9 je spektrum smykového napětí. Obě napětí vznikla po dosažení popuštění podpor 20 mm a jsou platná pro model s geometricko-fyzikální nelinearitou. Při posunutí podpor od hodnoty přibližně 8 mm výše začíná konstrukce postupně plastizovat.

Pro fyzikálně nelineární modely byla maximální dosažená reakce cca 520 kN, poté již byla konstrukce výrazně zplastizovaná.



Obr. 9: Symetrická polovina třímetrové kolejnice - smykové napětí [MPa]



Obr. 10: Napětí na průřezu ve středu délky kolejnice [MPa]

Pro názornost vývoje plastických oblastí uprostřed třímetrové kolejnice na geometricko-fyzikálně nelineárním modelu jsou na obr. 10 uvedeny tři vybrané kroky výpočtu. Obr. 10(a) představuje průběh napětí od ohybu před plastizací krajních vláken a odpovídá zatížení deformací o velikosti 7 mm. Obr. 10(b) zobrazuje počátek plastizace krajních vláken v čase odpovídající deformaci 11,5 mm. Při dosažení plné hodnoty zadané deformace 20 mm, které odpovídá obr. 10(c), je průřez blízko ke kompletnímu zplastizování a je zde vidět i malý posun neutrálné osy směrem nahoru.

Získané údaje byly využity při tvorbě modelu úseku kolejnice o délce 600 m. Výsledky získané na tomto modelu jsou dále uvedeny.

Tab. 1: Normálová vnitřní síla na kolejnici vzniklá popuštěním podpor pro různé tuhosti spojů

	$K_{x,1}$		$K_{x,10}$		$K_{x,100}$		$K_{x,\infty}$	
	$\pm N$ [kN]		$\pm N$ [kN]		$\pm N$ [kN]		$\pm N$ [kN]	
Δ_3	6,03	-1,14	31,21	-11,85	158,86	-77,57	457,07	-240,94
Δ_1	45,23	-135,23	179,60	-84,07	306,56	-141,58	457,07	-240,90
Δ_0	98,37	-70,11	276,15	-148,64	396,98	-169,34	457,07	-240,73

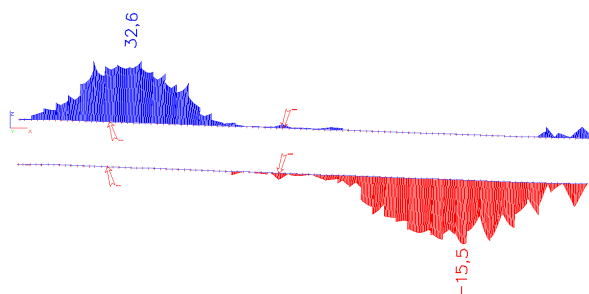
Tab. 1 popisuje závislost normálové síly v kolejnici na tuhosti podloží ve vodorovném směru a na prokluzu ve spoji mezi segmenty kolejnic (délka segmentu je 25 m). Do celkové tuhosti kolejového svršku vstupuje ještě rotační tuhost výše zmíněných kolejnicových styků. Tato tuhost byla stanovena zjednodušeným výpočtem přibližně na $2,4 \text{ MNmrad}^{-1}$. Vodorovná tuhost podloží byla očekávána v rozmezí od 1 do nekonečna MNm^{-1} . Prokluzu v kolejnicovém styku byly zadávány hodnotami 0, 1 a 3 mm. Tuhost proti posunutí byla stanovena podle vzorce (1).

$$K_{S49} = \frac{F_{\Sigma}}{\Delta_{20}} \quad (1)$$

kde:

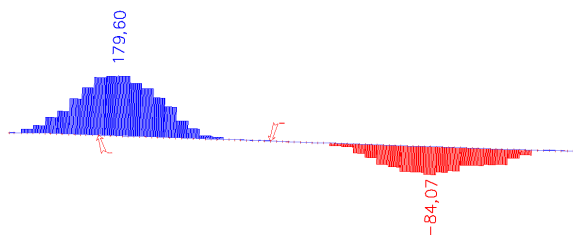
$K_{49\ E1}$	–	je tuhost proti posunutí	$[\text{Nm}^{-1}]$,
F_{Σ}	–	suma sil, reakcí v podporách	$[\text{N}]$ a
Δ_{20}	–	popuštění podpor	$[\text{m}]$.

Vztah (1) zahrnuje tuhost získanou z programu ANSYS pomocí předepsané deformace a sečtením silové odezvy (reakce) ve vnějších vazbách. Tento vztah byl použit také pro sestrojení grafu na obr. 7. Za pomoci tohoto vztahu byla zjednodušeně stanovena vodorovná tuhost podloží, kdy byla postupně volena deformace a síla a z těchto dvou parametrů byla dopočtena tuhost tak, aby posun kolejí odpovídal předpokládaným okrajovým podmínkám.



Obr. 11: Napětí od ohybu a normálové síly na kolejnici [MPa]

Na obr. 11 jsou napětí od kombinace ohybu a normálové síly. Normálová síla má na průběh a velikost napětí rozhodující vliv. Kolejnice je při své délce měkká a tedy i velikost rotační tuhosti spojky má malý vliv na přerozdělení reakcí a vnitřních sil. Napětí zde uvedené odpovídají hodnotám tuhostí a prokluzů ($K_{x,10}$, Δ_1) podle tab. 1. Tyto výsledky byly ze zpracovávaných dat vybrány, protože se nejvíce blíží reálné odezvě na pokles podloží.



Obr. 12: Normálová síla na kolejnici [kN]

Poslední obr. 12 zobrazuje hodnoty normálové síly podle nastavených parametrů tuhostí a prokluzů ($K_{x,10}$, Δ_1) v tab. 1. Pro tyto okrajové podmínky dosahují síly na kolejnici, při zadaném poklesu podloží, v tlaku velikost -84,07 kN a v tahu pak hodnoty 179,60 kN.

4 ZÁVĚR

Kolejnice typu 49 E1 je používána na řadě železničních tratí na území ČR a také na mnoha tratích na poddolovaném území. Stálá obnova a spravování těchto kolejových svršků je pracná a nákladná. Poklesy kolejí je obtížné předpovídat. Pokud vzniknou, mohou ihned, nebo v důsledku účinků dalších vlivů, vést k omezení nebo k úplnému zastavení provozu na takto postižených komunikacích.

Cílem numerických modelů má být předpověď možného chování kolejového svršku na základě naměřených poklesů a rozhodnout podle souhrnu informací o dalším vývoji a sanaci kolejového svršku. Především identifikovat místa a celky, které je nutno sanovat. V článku byly představeny numerické analýzy modelu kolejnice 49 E1, které by měly základem pro tvorbu takového komplexního numerického modelu. Výsledky uvedené v článku mají vzhledem k použitým parametrům materiálu předběžný charakter a omezenou platnost. Zatím nebyly ověřeny laboratorními

zkouškami. Autoři se budou v dalším výzkumu a modelování metodou konečných prvků zabývat provedením parametrické studie pro jednotlivé vstupní parametry. Bude zde uváženo také vliv dynamiky podobně jako [6] a [9].

PODĚKOVÁNÍ

Práce byly podporovány z prostředků koncepčního rozvoje vědy, výzkumu a inovací pro rok 2012 přidělených VŠB-TU Ostrava Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

LITERATURA

- [1] ČSN 73 6301 *Projektování železničních drah*. Praha: Český normalizační institut, 1998. 20 s.
- [2] HRUZÍKOVÁ, M. Použití podrazcových podložek v srdcovkách výhybek. *Stavební obzor*. 2011, roč. 20, č. 3, s. 69-72. ISSN 1210-4027.
- [3] NOORZAEI, J., POUR, PM., JAAFAR, MS., ET AL. Numerical Simulation of Railway Track Supporting System Using Finite-Infinite and Thin Layer Elements Under Impulsive Loads. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2012, Vol. 18, Iss. 2, p. 245-252. ISSN 1392-3730. DOI:10.3846/13923730.2012.671286.
- [4] RINGSBERG, JW., FRANKLIN, FJ., JOSEFSON, BL., KAPOOR, A, NIELSEN, JCO. Fatigue evaluation of surface coated railway rails using shakedown theory, finite element calculations, and lab and field trials. *International Journal of Fatigue*. 2005, Vol. 27, Iss. 6, p. 680–694. ISSN 0142-1123. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2004.11.002.
- [5] RELEASE 11 DOCUMENTATION FOR ANSYS, SAS IP, INC., 2007.
- [6] KORTIŠ, J. Estimation of Modal Parameters by using Operational Modal Analysis, In *Proceedings of the 5th International Conference on Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering*, DYN-WIND 2011, 30.05-02.06.2011, Jasná pod Chopkom, Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 978-80-554-0354-0.
- [7] KULKARNI, SM., HAHN, GT., RUBIN, CA., BHARGAVA, V. Elasto-Plastic Finite Element Analysis of Repeated Three-Dimensional, Elliptical Rolling Contact With Rail Wheel Properties. *Journal of Tribology*. 1991, Vol. 113, Issue 3, p. 434, 8 pages. ISSN 0742-4787. DOI: 10.1115/1.2920643.
- [8] Scia Engineer [online]. 2012 [cit. 2012-01-01]. Dostupný z < <http://www.scia-online.com> >.
- [9] SHABANA, AA., CHAMORRO, R., RATHOD, C., A multi-body system approach for finite-element modelling of rail flexibility in railroad vehicle applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*. 2008, Vol. 222, Iss. 1, p. 1-15. ISSN 1464-4193. DOI: 10.1243/14644193JMBD117.
- [10] SUCHARDA, O., BROŽOVSKÝ, J. Pružnoplustické modelování železobetonového nosníku: implementace a srovnání s experimentem. *Sborník vědeckých prací VŠB-TUO, řada stavební*. 2011, roč. 11, č. 1, s. 237-244. ISSN 1213-1962.
- [11] TOMICA, V., BROUL, J., HUDEČEK, L. Nové prvky v konstrukci železničního tělesa v poddolovaném a zátopovém území. *Sborník vědeckých prací VŠB-TUO, řada stavební*. 2001, roč. 1, č. 1, s. 11-19. ISSN 1213-1962.
- [12] ZIENKIEWICZ, O. C. *The Finite Element Methode in Engineering Science*. London: McGraw-Hill, 1971.

Oponentní posudek vypracoval:

Prof. Ing. Ján Bujňák, CSc., Katedra stavebných konstrukcí a mostov, Stavebná fakulta, ŽU v Žiline.
Doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D., Ústav železničních konstrukcí a staveb, Fakulta stavební, VUT v Brně.